Iranian Food Science and Technology
Research Journal
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir

Research Article
Vol. 21, No. 2, May.-Jun., 2025, p. 165-178

Investigating the Effect of Different Concentrations of Organic Acids (Ascorbic, Citric, Malic, and Tartaric) on the Viscosity and Rheological Properties of Balangu Seed Gum

F. Salehi[1*], M. Tashakori[1], K. Samary[1]

1- Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Industry, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
(*- Corresponding Author Email: F.Salehi@basu.ac.ir)

Received: 05.06.2024 Revised: 30.01.2025 Accepted: 23.03.2025 Available Online: 23.04.2025	**How to cite this article:** Salehi, F., Tashakori, M., & Samary, K. (2025). Investigating the effect of different concentrations of organic acids (ascorbic, citric, malic, and tartaric) on the viscosity and rheological properties of Balangu seed gum. *Iranian Food Science and Technology Research Journal, 21*(2), 165-178. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2025.88385.1337

Introduction

Balangu seed gum (BSG) is a hydrocolloid extracted from the seeds of *Lallemantia royleana* L.. This gum works as thickener and stablilizer in food products. This gum had high performance compared to some commercially available food grade gums. When this gum is mixed with water, it becomes thick (viscous fluid) and this gel-like substance becomes thin when stirred or shaken (pseudoplastic behavior) (Salehi & Inanloodoghouz, 2023). The term organic acid refers to organic compounds with acidic properties. The acidity of organic acids is associated with their carboxyl group and therefore they are called carboxylic acids. Organic acids can be classified according to the type of carbon chain (aliphatic, alicyclic, aromatic, and heterocyclic), their extent of saturation and substitution, and the number of carboxyl groups (mono-, di-, tri-carboxylic). Monocarboxylic acids like acetic acid are highly volatile liquids with a pungent taste. Malic and tartaric acids are also dicarboxylic acids that contain one and two hydroxyl groups, respectively. Citric acid is the best-known tricarboxylic acid with one hydroxyl group that is found in foods (Yildiz, 2010). The most abundant organic acid in citrus juice is citric acid. Also, citrus juices such as lemons, oranges, and grapefruits are a good source of ascorbic acid (Nour *et al.*, 2010). pH is an important parameter that affects the rheological properties of hydrocolloid solutions. Addition of acid to an aqueous gum solution leads to changes in pH which affect the viscosity of this solution (Hayta *et al*., 2020). In this study the effect of four edible organic acids (ascorbic, citric, malic, and tartaric) at two concentrations (0.5, and 1 %) on the viscosity and rheological behavior of Balangu seed gum solution (0.2%, w/v) was investigated.

Material and Methods

In this research, organic acids including ascorbic, citric, malic, and tartaric were purchased in powder form (China) and dissolved in distilled water. Two concentrations of each acid, 0.5% and 1%, were prepared, and the distilled water was considered as the control (0% acid). The Balangu seed gum solutions were prepared by disolving the gum powder (0.20%, w/v) in distilled water containing different concentrations of ascorbic, citric, malic, and tartaric acids using a magnetic stirrer. The rheological parameters of Balangu seed gum dispersions were measured using a viscometer (Brookfield, DV2T, RV, USA) at 20°C. Power law, Bingham, Herschel-Bulkley, and Casson models are common ways of representing the behavior of several gum dispersions. In this research, these models were used to match the shear stress and shear rate results of the gum solutions containing edible organic acids. Differences between means were established using Duncan's multiple range using SPSS (version 21).

Results and Discussion

The findings of this study showed that the apparent viscosity of Balangu seed gum solution reduced when the shear rate increased. Additionally, the apparent viscosity of the Balangu seed gum solution reduced as the organic

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2025.88385.1337

acids concentration increased. The highest decrease in viscosity was related to solution containing 1% citric acid and the lowest was related to tartaric acid with a concentration of 0.5%. The rheological behavior of solutions was successfully modeled using Power law, Bingham, Herschel-Bulkley, and Casson models, and the Power law model was the best one for describing the behavior of Balangu seed gum solutions containing organic acids. The Power law model had a good performance with the highest correlation coefficient (>0.9406) and least sum of squared error (<0.0090) and root mean square error (<0.0275) for all samples. The consistency coefficient of the samples reduced as the acid percent was increased. Sample containing 1% citric acid had the lowest consistency coefficient and sample containing 0.5% malic acid had the highest consistency coefficient. The Power law model shows that a fluid with shear-thinning behavior has a value of flow behavior index less than 1 (Kumar *et al*., 2021). By adding acid to Balangu seed gum solution, the flow behavior index of most samples increased. The Bingham yield stress of all samples reduced when acids percent was increased. The dispersion containing 1% citric acid had the lowest Bingham yield stress and the sample containing 0.5% tartaric acid had the highest yield stress. The Bingham plastic viscosity of the samples reduced when acids percent was increased. The solution containing 0.5% ascorbic acid had the highest Bingham plastic viscosities (0.0038 Pa.s) and the sample containing 0.5% malic acid had the lowest plastic viscosities (0.0014 Pa.s). The results showed that when the ascorbic acid concentration was increased from 0.5% to 1%, the Casson plastic viscosities of the Balangu seed gum solution was decreased significantly from 0.054 Pa.s to 0.042 Pa.s (p<0.05).

Conclusion

The results of this study indicated that it is a mistake to use Balangu seed gum in food products containing high concentrations of citric acid, and this acid reduces the viscosity and consistency of the products containing this gum.

Keywords: Balangu seed gum, Consistency coefficient, Flow behavior index, Herschel-Bulkley, Organic acid

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
https://ifstrj.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۴، ص. ۱۷۸-۱۶۵

بررسی اثر اسیدهای آلی (آسکوربیک، سیتریک، مالیک و تارتاریک) در غلظت‌های مختلف بر ویسکوزیته و خصوصیات رئولوژیکی صمغ دانه بالنگو

فخرالدین صالحی [1]*- مریم تشکری [1]- کیمیا ثمری [1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۳

چکیده

علم رئولوژی کاربردهای زیادی در فرآوری و انتقال مواد غذایی دارد. بررســی قوام و رفتار جریان هیدروکلوئیدها در حضــور ترکیبات مختلف به‌دلیل خواص ساختاری و بافتی که در مواد غذایی ایجاد می‌کنند، بسیار مهم است. از اسیدهای آلی خوراکی آلی مانند اسید مالیک، اسید سیتریک، اسید آسکوربیک و اسید تارتاریک برای کنترل pH در برخی از محصولات غذایی استفاده می‌شود. در این مطالعه اثر این چهار اسید آلی خوراکی بر ویسکوزیته و رفتار رئولوژیکی محلول صمغ دانه بالنگو بررسی شد. برای تهیه محلول‌های مورد استفاده جهت آزمایش‌های رئولوژیکی، ۰/۲ درصد (وزنی/حجمی) از پودر صمغ دانه بالنگو درون محلول تهیه شده از هر اسید در دو غلظت ۰/۵ و ۱ درصد، توسط همزن مغناطیسی به‌صورت کامل حل شد. برای اندازه‌گیری خصوصیات رئولوژیکی محلول‌های حاوی اسید و صمغ دانه بالنگو، از یک ویسکومتر چرخشی استفاده شد. یافته‌های این مطالعه نشان داد که ویسکوزیته ظاهری محلول صمغ دانه بالنگو با افزایش سرعت برشی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، ویسکوزیته ظاهری محلول صمغ دانه بالنگو با افزایش غلظت اسیدهای آلی کاهش یافت. بیشترین کاهش ویسکوزیته مربوط به محلول حاوی ۱ درصد اسید سیتریک و کمترین آن مربوط به اسید تارتاریک با غلظت ۰/۵ درصد بود. مدل قانون توان بهترین مدل برای توصیف رفتار محلول‌های صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی بود. نتایج براش داده‌های سرعت برشی-تنش برشی محلول شاهد صمغ دانه بالنگو نشان داد که مجموع مربعات خطا مدل‌های قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۱۶، ۰/۰۸۷۰، ۰/۰۰۱۶ و ۰/۰۲۳۱ است. با افزایش درصد اسید، ضریب قوام نمونه‌ها کاهش یافت. نمونه‌های حاوی ۱٪ اسید سیتریک دارای کمترین ضریب قوام و نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ اسید مالیک دارای بیشترین ضریب قوام بودند. با افزودن اسید به محلول صمغ دانه بالنگو، شاخص رفتار جریان اکثر نمونه‌ها افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: اسید آلی، شاخص رفتار جریان، صمغ دانه بالنگو، ضریب قوام، هرشل بالکلی

مقدمه

صمغ‌ها (هیدروکلوئیدها) به‌عنوان تغلیظ کننده در بهبود ویسکوزیته، قوام و خواص بافتی محصولات غذایی نقش مهمی دارند (Ozgur *et al.*, 2017). صمغ‌های مختلفی مانند گوار، گزانتان، پکتین، کارایا، کاراگینان، کربوکسی متیل سلولز، عربی و آلژینات در محصولات مختلف غذایی مانند انواع نوشیدنی‌ها، سس‌ها، محصولات لبنی، غذاهای فوری، سوپ‌ها، دسرها، محصولات نانوایی و قنادی استفاده می‌شوند (Hayta *et al.*, 2020; Kang *et al.*, 2023; Nor Hayati *et al.*, 2016; Salehi, 2020). صمغ دانه بالنگو یک هیدروکلوئید استخراج شده از دانه‌های *Lallemantia royleana* L. است. امکان استفاده از این صمغ برای افزایش قوام محصولات مختلف غذایی و ثابت نگه داشتن آن وجود دارد. این ویژگی باعث می‌شود که آن را به

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: F.Salehi@basu.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2025.88385.1337

انتخاب خوبی برای استفاده در محصولات غذایی تبدیل کند. این صمغ در مقایسه با برخی از صمغ‌های خوراکی موجود در بازار بسیار خوب عمل می‌کند. هنگامی‌که این صمغ با آب مخلوط می‌شود، باعث افزایش ویسکوزیته آن می‌شود. البته ویسکوزیته این ماده ژل مانند در هنگام هم زدن کاهش می‌یابد و محصول رفتار شبه پلاستیک[1] از خود نشان می‌دهد (Salehi & Inanloodoghouz, 2023).

اصطلاح اسید آلی به ترکیبات آلی با خواص اسیدی اشاره دارد. اسیدیته اسیدهای آلی با گروه کربوکسیل آنها مرتبط است و به همین دلیل به آنها اسیدهای کربوکسیلیک می‌گویند. اسیدهای آلی را می‌توان بر اساس نوع زنجیره کربن (آلیفاتیک[2]، آلیسیکلیک[3]، آروماتیک[4] و هتروسیکلیک[5])، میزان اشباع و جایگزینی آنها و تعداد گروه‌های کربوکسیل (مونو، دی، تری کربوکسیلیک) طبقه‌بندی کرد. اسیدهای مونو کربوکسیلیک، مانند اسید استیک مایعات بسیار فرار با طعمی تند هستند. اسیدهای مالیک و تارتاریک نیز اسیدهای دی کربوکسیلیک و به‌ترتیب حاوی یک و دو گروه هیدروکسیل هستند. اسید سیتریک نیز شناخته‌شده‌ترین اسید تری کربوکسیلیک با یک گروه هیدروکسیل است که در میوه‌ها یافته شده و در فرمولاسیون مواد غذایی به کار برده می‌شود. از اسیدهای آلی خوراکی معمولاً برای کنترل pH در برخی از محصولات غذایی استفاده می‌شود (Yildiz, 2010). فراوان‌ترین اسید آلی در آب مرکبات، اسید سیتریک است. همچنین، آب مرکباتی مانند لیموشیرین، پرتقال و گریپ‌فروت منبع خوبی برای اسید آسکوربیک هستند (Nour *et al.*, 2010).

افزودن اسید به محلول آبی حاوی صمغ‌ها و در نتیجه تغییر pH محلول، جزء عوامل مهم و تأثیرگذار بر ویسکوزیته و خواص رئولوژیکی محلول‌های هیدروکلوئیدی است (Hayta *et al.*, 2020). هایتا و همکاران (Hayta *et al.*, 2020) تأثیر pH بر محلول‌های مخلوط صمغ گالاکتومانان-گزانتان را بررسی و گزارش کردند که ضریب قوام صمغ‌ها در pH پایین (حدود ۲) کاهش یافته و ویسکوزیته ظاهری محلول‌ها هم به pH محلول وابسته بوده است. صالحی و همکاران (Salehi *et al.*, 2024) تأثیر اسیدهای آلی بر ویسکوزیته و رفتار رئولوژیکی محلول صمغ گوار را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش غلظت اسید آلی، مقادیر ضریب قوام محلول‌ها کاهش می‌یابد (Salehi *et al.*, 2024). همچنین نمونه حاوی ۱ درصد اسید تارتاریک کمترین مقدار ضریب قوام و نمونه حاوی ۰/۵ درصد اسید آسکوربیک دارای بیشترین مقدار ضریب قوام بودند. مدینا-تورس و همکاران (Medina-Torres *et al.*, 2000) گزارش کردند که ویسکوزیته صمغ انجیر تیغی هندی[6] با کاهش pH محلول از ۷ به ۲، به‌شدت کاهش می‌یابد. تغییر ویسکوزیته صمغ‌های گوار، پکتین و کربوکسی متیل سلولز در شرایط آزمایشگاهی توسط برنلی و همکاران (Brenelli *et al.*, 1997) مورد مطالعه قرار گرفت. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش یا کاهش pH محلول صمغ‌ها (شرایط قلیایی یا اسیدی)، ویسکوزیته آنها به‌صورت معنی‌داری کاهش می‌یابد (Brenelli *et al.*, 1997). در مطالعه اوزگور و همکاران (Ozgur *et al.*, 2017)، خواص جریانی یک سیستم صمغ سه‌تایی از گزانتان، کربوکسی متیل سلولز و پکتین در یک سیستم مدل تهیه شده با اسیدهای آلی شامل اسید سیتریک و تارتاریک و در حضور ساکارز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که کربوکسی متیل سلولز بالاترین ضریب قوام را در بین صمغ‌ها در سیستم‌های مدل اسید سیتریک-ساکارز و اسید تارتاریک-ساکارز داشت (Ozgur *et al.*, 2017).

خصوصیات رئولوژیکی هیدروکلوئیدها به‌دلیل خواص ساختاری و بافتی که در محصولات غذایی ایجاد می‌کنند، بسیار مهم است (Koocheki *et al.*, 2022). در این مطالعه، اثر افزودن اسیدهای آلی خوراکی شامل آسکوربیک، سیتریک، مالیک و تارتاریک در دو غلظت ۰/۵ ٪ و ۱٪ بر تغییر ویسکوزیته و خواص رئولوژیکی محلول تهیه شده از صمغ دانه بالنگو بررسی شد و داده‌های رفتار جریان محلول‌ها با مدل‌های قانون توان[7]، بینگهام[8]، هرشل بالکلی[9] و کاسون[10]، برازش شدند.

مواد و روش‌ها

تولید محلول‌های اسیدی حاوی صمغ دانه بالنگو

در این پژوهش اسیدهای آلی شامل آسکوربیک، تارتاریک، مالیک و سیتریک (ttca، چین) به‌صورت پودر خریداری و در آب مقطر حل شدند. از هر اسید دو غلظت ۰/۵٪ و ۱٪ تهیه و نمونه حاوی آب مقطر (۰٪ اسید) به‌عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد (Salehi *et al.*, 2024).

برای تهیه صمغ دانه بالنگو، دانه‌های بالنگو از استان همدان تهیه و ناخالصی آن‌ها جداسازی گردید. ابتدا دانه‌های بالنگو به‌مدت ۲۰ دقیقه درون آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس و نسبت آب به دانه برابر ۲۰ به ۱ قرار گرفتند (Satorabi *et al.*, 2021). صمغ خارج شده از دانه‌ها،

1- Pseudoplastic behavior
2- Aliphatic
3- Alicyclic
4- Aromatic
5- Heterocyclic

6- *Opuntia ficus-indica*
7- Power law
8- Bingham
9- Herschel-Bulkley
10- Casson

توسط یک جداکننده آزمایشگاهی جدا (FJ-479، تولیپس، ایران) و سپس توسط آون (شیماز، ایران) در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک و در نهایت با آسیاب، به شکل پودر تبدیل گردید. پودر صمغ آسیاب شده، بسته‌بندی و در جای خشک و خنک نگهداری شد.

برای تهیه محلول‌های مورد استفاده جهت آزمایش‌های رئولوژیکی، ۰/۲ درصد (وزنی/حجمی) از پودر صمغ دانه بالنگو درون محلول تهیه شده از هر اسید به‌صورت کامل حل شد (توسط همزن مغناطیسی، شیماز، ایران). برای تکمیل آبگیری صمغ نیز یک ساعت محلول در جای خنک نگهداری شد. برای تهیه نمونه شاهد، ۰/۲ درصد از صمغ در آب مقطر حل و به‌مدت یک ساعت در دمای اتاق نگهداری جهت تکمیل فرآیند آبگیری نگهداری شد (Salehi *et al.*, 2024).

اندازه‌گیری ویسکوزیته و تنش برشی

برای اندازه‌گیری خصوصیات رئولوژیکی محلول‌های حاوی اسید و صمغ دانه بالنگو، از یک ویسکومتر چرخشی (بروکفیلد، DV2T، RV، آمریکا) استفاده شد. با استفاده از این دستگاه، ویسکوزیته و تنش برشی نمونه‌ها در سرعت برشی ۱۲/۲ تا ۱۷۱/۲ بر ثانیه با استفاده از کیت UL آداپتور در دمای ۲۰ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد (Salehi *et al.*, 2023). برای اندازه‌گیری ویسکوزیته ظاهری محلول‌ها نیز ویسکوزیته نمونه‌ها در سرعت برشی ۴۹ بر ثانیه اندازه‌گیری شد.

مدل‌های رئولوژیکی

هیدروکلوئیدها و مشتقات آنها عموماً به‌صورت محلول استفاده می‌شوند؛ بنابراین، دانش در مورد خواص رئولوژیکی محلول هیدروکلوئیدی برای ارائه اطلاعات‌پایه برای کاربردهای مختلف ضروری است (Liu *et al.*, 2016). در این پژوهش از معادلات قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون برای بررسی رفتار رئولوژیکی صمغ‌ها استفاده شد (Salehi & Inanloodoghouz, 2023).

آنالیز آماری

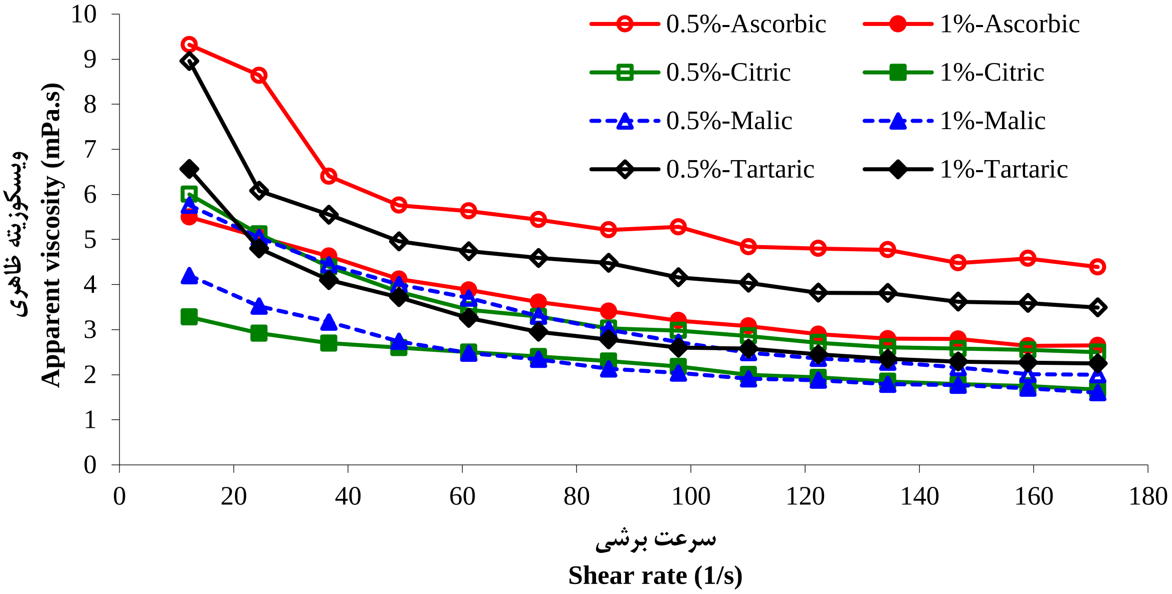
در این پژوهش اثر چهار اسیدهای آلی در دو غلظت ۰/۵ و ۱ درصد بر تغیر ویسکوزیته و خصوصیات رئولوژیکی صمغ دانه بالنگو بررسی شد. در این پژوهش از مدل‌های قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون برای برازش نتایج تنش برشی و سرعت برشی محلول‌های صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی خوراکی استفاده شد. برای برازش داده‌ها و محاسبه مقادیر ثابت مدل‌ها، از نرم‌افزار متلب (نسخه R2012a) و جعبه ابزار برازش داده‌ها (cftool) استفاده شد. پارامترهای ضریب تبیین (r)، مجموع مربعات خطا (SSE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای هر مدل محاسبه و گزارش شد. این پژوهش بر پایه طرح کاملاً تصادفی انجام و با استفاده از نرم‌افزار SPSS 21 تجزیه و تحلیل شد. تمام آزمون‌ها در سه تکرار انجام و برای مقایسه میانگین پاسخ‌های مشاهده شده، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۹۵٪ استفاده شد.

نتایج و بحث

ویسکوزیته ظاهری محلول‌ها

غذاها از نظر ساختاری و رئولوژیکی مواد پیچیده‌ای هستند و در بسیاری از موارد، غذاها از مخلوطی از مواد جامد و همچنین اجزای ساختاری سیال تشکیل شده است (Sharoba & Ramadan, 2011). در این پژوهش داده‌های ویسکوزیته به‌عنوان تابعی از سرعت برشی جمع‌آوری شدند. شکل ۱ نحوه تغییر ویسکوزیته محلول صمغ دانه بالنگو هنگام اعمال برش در سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که ویسکوزیته ظاهری محلول صمغ دانه بالنگو زمانی که سریع‌تر همزده شود، کمتر می‌شود (رفتار سودوپلاستیکی یا شل شدن برشی). رفتار سودوپلاستیکی به‌دلیل جهت‌گیری زنجیره‌های پلیمری در جهت تنش برشی است که منجر به کاهش برهمکنش‌ها و شکستن پیوندهای قوی در سرعت‌های برشی بالا می‌شود (Behrouzian *et al.*, 2013; Farahnaky *et al.*, 2013). در این مطالعه، ویسکوزیته ظاهری نمونه حاوی ۰/۵ اسید آسکوربیک با افزایش سرعت برشی از ۱۲/۲ برثانیه به ۱۷۱/۲ برثانیه، از ۹/۳ میلی‌پاسکال ثانیه به ۴/۴ میلی‌پاسکال ثانیه کاهش یافت.

صمغ‌های طبیعی ممکن است خواص نامطلوبی از خود نشان دهند، از جمله سرعت کنترل نشده هیدراتاسیون، حلالیت وابسته به pH، سفت شدن، کاهش ویسکوزیته طی زمان نگهداری و آلودگی میکروبی. عملکرد غیرقابل‌پیش‌بینی صمغ‌های طبیعی می‌تواند استفاده از این مواد را در کاربردهای خاص محدود کند (Rana *et al.*, 2011). ویسکوزیته محلول صمغ دانه بالنگو در حضور اسیدهای آلی مختلف در جدول ۱ گزارش شده است. افزودن اسیدهای آلی به صمغ دانه بالنگو، ویسکوزیته آن را کاهش داد. این رفتار برای تمام اسیدهای آلی مشاهده شد و ویسکوزیته ظاهری صمغ دانه بالنگو با افزایش غلظت اسیدهای آلی از ۰ به ۱ درصد کاهش یافت. همراستا با نتایج این پژوهش، یوسفی و همکاران (Yousefi *et al.*, 2022) نیز گزارش کردند که کاهش pH از ۷ به ۳، منجر به کاهش ویسکوزیته ذاتی محلول صمغ دانه قدومه شهری می‌شود و این کاهش ویسکوزیته در شرایط اسیدی قوی را به کاهش وزن مولکولی و کوتاه‌تر شدن طول زنجیره جانبی ماکرومولکول‌ها مرتبط دانسته‌اند (Yousefi *et al.*, 2022).



شکل ۱- تأثیر سرعت برشی بر ویسکوزیته ظاهری محلول صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی مختلف

Fig. 1. Impact of shear rate on the apparent viscosity of Balangu seed gum solution containing various organic acids

جدول ۱- تأثیر اسیدهای آلی بر ویسکوزیته ظاهری محلول صمغ دانه بالنگو (سرعت برشی برابر ٤٩ برثانیه)

Table 1- Impact of organic acids on the apparent viscosity of Balangu seed gum solution (shear rate=49)

اسید آلی Organic acid	غلظت اسید Acid concentration	ویسکوزیته ظاهری Apparent viscosity (mPa.s)
شاهد Control	0%	24.96±0.35 [a]
آسکوربیک Ascorbic	0.5%	5.33±0.40 [b]
سیتریک Citric		3.64±0.40 [c]
مالیک Malic		3.93±0.25 [c]
تارتاریک Tartaric		5.85±0.74 [b]
آسکوربیک Ascorbic	1%	3.96±0.11 [c]
سیتریک Citric		2.56±0.06 [d]
مالیک Malic		3.08±0.27 [cd]
تارتاریک Tartaric		3.48±0.62 [c]

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنادار است (p<۰/۰۵)

Different letters within each column represent significance difference (p<0.05).

بیشترین کاهش ویسکوزیته مربوط به محلول حاوی ۱ درصد اسید سیتریک و کمترین آن مربوط به اسید تارتاریک با غلظت ۰/۵ درصد بود. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اسید تارتاریک از ۰/۵ به ۱ درصد، ویسکوزیته صمغ دانه بالنگو به‌صورت معنی‌داری (p<۰/۰۵) از ۵/۸۵ میلی‌پاسکال ثانیه به ۳/۴۸ میلی‌پاسکال ثانیه کاهش یافت (سرعت برشی برابر ۴۹ بر ثانیه). امین و همکاران (Amin *et al.*, 2007) پارامترهای رئولوژیکی صمغ دانه دوریان را مطالعه کردند و دریافتند که بیشترین ویسکوزیته صمغ در حالت خنثی است و در مقادیر pH پایین و بالا، ویسکوزیته محلول صمغ به‌دلیل تخریب زنجیره‌های

پلیمری تحت شرایط اسیدی و قلیایی کاهش می‌یابد (Amin et al., 2007). مدینا-تورس و همکاران (Medina-Torres et al., 2000) نیز به این نتیجه رسیدند که افزایش ویسکوزیته ظاهری با pH احتمالاً به تغییرات ساختاری در مولکول‌های صمغ مربوط می‌شود. بهروزیان و همکاران (Behrouzian et al., 2013) گزارش کردند که تغییر pH تأثیر کمی بر تغییر ویسکوزیته ظاهری و ضریب قوام صمغ دانه شاهی دارد و کاهش pH از ۵ به ۳ باعث کاهش ۱۷ درصدی در ویسکوزیته ظاهری صمغ دانه شاهی (غلظت برابر ۲٪) شد.

مدلسازی رئولوژیکی

مطالعه روی رفتار رئولوژیکی محلول‌ها و مواد غذایی مایع، برای کاربردهای مرتبط با جابجایی، ذخیره‌سازی، فرآوری، کنترل کیفیت، پمپاژ، عملیات انتقال حرارت و جرم و تجزیه‌وتحلیل حسی غذاها مهم است (Sharoba & Ramadan, 2011). در فرآیند مدل‌سازی، مدل‌های بررسی‌شده دارای ضرایبی هستند که با برازش آنها با نتایج آزمایش‌های واقعی، این ضرایب بدست می‌آیند (Mullineux & Simmons, 2008). رفتار جریان محلول صمغ دانه بالنگو با استفاده از مدل‌های قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون به‌خوبی مدل‌سازی شد و مدل قانون توان به‌عنوان مدل بهتر برای توصیف رفتار جریانی محلول صمغ دانه بالنگو انتخاب شد. جدول ۲ تناسب داده‌های به‌دست آمده از معادلات رئولوژیکی با داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. نتایج براش داده‌های سرعت برشی-تنش برشی نشان داد که ضریب تبیین مدل‌های قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون به‌ترتیب برابر ۰/۹۹۹۷، ۰/۹۸۲۸، ۰/۹۹۹۷ و ۰/۹۹۵۴ است. این جدول نشان می‌دهد که هر دو معادله قانون توان و هرشل بالکلی در پیش‌بینی روابط بین داده‌های تنش برشی و سرعت برشی محلول صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی به یک اندازه مناسب هستند؛ اما چون تعداد پارامترهای مدل قانون توان کمتر است (دو پارامتر) و تنش تسلیم محاسبه شده توسط معادله هرشل بالکلی نزدیک صفر است، لذا مدل قانون توان به‌عنوان مدل مناسب برای بررسی خصوصیات رئولوژیکی محلول‌ها انتخاب شد. نتایج براش داده‌های سرعت برشی-تنش برشی محلول شاهد صمغ دانه بالنگو نشان داد که مجموع مربعات خطا مدل‌های قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۱۶، ۰/۰۸۷۰، ۰/۰۰۱۶ و ۰/۰۲۳۱ است. مدل قانون توان به‌عنوان معادله مناسب برای بررسی رفتار رئولوژیکی محلول صمغ‌های مختلفی استفاده و به‌عنوان مدل مناسب برای محلول‌های مشابه پیشنهاد شده است (Salehi & Inanloodoghouz, 2023).

جدول ۲- قابلیت برازش معادلات مختلف رئولوژیکی برای داده‌های تنش برشی (پاسکال) آزمایشگاهی (نمونه شاهد)

Table 2- Fitting ability of various rheological equations for experimental shear stress (Pa) data (control sample)

سرعت برشی Shear rate (s^{-1})	داده آزمایشگاهی Experimental data	مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مختلف Predicted values by various models			
		قانون توان Power law	بینگهام Bingham	هرشل بالکلی Herschel-Bulkley	کاسون Casson
12.23	0.540	0.523	0.737	0.550	0.647
24.46	0.830	0.782	0.885	0.823	0.859
36.69	1.049	0.991	1.033	1.042	1.042
48.92	1.237	1.171	1.181	1.232	1.210
61.15	1.401	1.333	1.329	1.402	1.368
73.38	1.558	1.483	1.477	1.559	1.519
85.61	1.714	1.622	1.625	1.706	1.666
97.84	1.839	1.753	1.773	1.844	1.808
110.1	1.980	1.877	1.922	1.975	1.947
122.3	2.098	1.996	2.069	2.099	2.083
134.5	2.192	2.109	2.217	2.219	2.217
146.8	2.325	2.219	2.366	2.334	2.349
159	2.450	2.325	2.513	2.445	2.479
171.2	2.575	2.427	2.661	2.553	2.606
مجموع مربعات خطا Sum of squared error (SSE)		0.0016	0.0870	0.0016	0.0231
ضریب تبیین Correlation coefficient (r)		0.9997	0.9828	0.9997	0.9954
جذر میانگین مربعات خطا Root mean square error (RMSE)		0.0116	0.0851	0.0122	0.0439

مدل قانون توان

سیالات غیر نیوتنی یک رابطه تنش برشی و سرعت برشی را نشان می‌دهند که قانون اصطکاک داخلی نیوتن را به‌دلیل غیرخطی بودن و تنش تسلیم اولیه نقض می‌کند. سیالات غیر نیوتنی ممکن است یک یا چند ویژگی رئولوژیکی را نشان دهند، به‌عنوان مثال، سفت شدن برشی، شل شدن برشی، تیکسوتروپی و غیره (Sun *et al.*, 2024). معادله ۱، پارامترهای مربوط به مدل قانون توان را نشان می‌دهد.

$$\tau = k\dot{\gamma}^{n} \qquad (۱)$$

در این معادله، $\dot{\gamma}$ سرعت برشی (s^{-1})، τ تنش برشی (پاسکال)، k ضریب قوام ($Pa.s^n$) و n شاخص رفتار جریان (بدون واحد) هستند (Salehi & Inanloodoghouz, 2023). در این پژوهش، مدل قانون توان توصیف خوبی از رابطه بین تنش برشی و سرعت برشی با بیشترین مقدار ضریب تبیین (>۰/۹۴۰۶)، و حداقل مجموع مربعات خطا (<۰/۰۰۹۰) و جذر میانگین مربعات خطا (<۰/۰۲۷۵) برای همه نمونه‌ها داشت (جدول ۳).

وجود اسیدهای آلی در محلول حاوی صمغ دانه بالنگو تأثیر قابل توجهی بر تغییرات ضریب قوام و شاخص رفتار جریان محلول صمغ داشت. در جدول ۳ تأثیر اسیدهای آلی بر مقدار ضریب قوام محلول صمغ دانه بالنگو گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد اسید، مقدار ضریب قوام نمونه‌ها کاهش می‌یابد. نمونه‌های حاوی ۱٪ اسید سیتریک دارای کمترین ضریب قوام و نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ اسید مالیک دارای بیشترین ضریب قوام بودند. نتایج نشان می‌دهد وقتی غلظت اسید مالیک از ۰/۵ به ۱ درصد افزایش یافت، مقدار ضریب قوام نمونه‌ها به‌صورت معنی‌داری از $Pa.s^n$ ۰/۰۲۹ به $Pa.s^n$ ۰/۰۱۶ کاهش یافت (p<۰/۰۵). همراستا با نتایج این پژوهش، فرحناکی و همکاران (Farahnaky *et al.*, 2013) گزارش کردند که تغییرات pH تأثیر قابل توجهی بر رفتار رئولوژیکی محلول صمغ دانه مرو (۱ درصد) دارد و کمترین مقدار ضریب قوام مربوط به نمونه با pH پایین و اسیدی بود.

تغییر در مقدار ضریب قوام و شاخص رفتار جریان محلول صمغ دانه بالنگو، به‌دلیل تغییرات ساختاری صمغ در حضور غلظت‌های مختلف اسیدها می‌باشد. در معادله قانون توان، یک سیال با رفتار شل شدن برشی مقدار شاخص رفتار جریان کمتر از ۱ دارد (Kumar *et al.*, 2021). تأثیر اسیدهای آلی بر مقدار شاخص رفتار جریان محلول صمغ دانه بالنگو در جدول ۳ گزارش شده است. با افزایش غلظت اسید، مقدار شاخص رفتار جریان اکثر نمونه‌ها افزایش یافت (کاهش در رفتار شل شدن برشی). نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید اسکوربیک دارای بالاترین مقدار شاخص رفتار جریان و نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید مالیک کمترین مقدار را داشت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اسید مالیک از ۰/۵ درصد به ۱ درصد، شاخص رفتار جریان محلول از ۰/۴۹۴ به ۰/۵۷۳ افزایش می‌یابد.

مدل بینگهام

مدل بینگهام تنش تسلیم محدودی را در نرخ برش صفر نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر، برای مدل بینگهام، زمانی که نرخ تغییر شکل کاهش می‌یابد (و به صفر می‌رسد) تا زمانی که تنش از تنش تسلیم فراتر رود، سیال با ویسکوزیته پلاستیکی ثابت جریان می‌یابد. مزیت مدل بینگهام این است که فرصتی را برای تعیین تنش تسلیم که در آن یک سیال شروع به جریان می‌کند ارائه می‌دهد، اما رابطه سازنده خطی مدل، توصیف آن را از رفتار رئولوژیکی سیالات پیچیده‌تر محدود می‌کند (Sun *et al.*, 2024).

در این پژوهش از مدل بینگهام نیز برای بررسی رابطه بین تنش برشی و سرعت برشی محلول‌های صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی استفاده شد. در معادله ۲، پارامترهای مربوط به مدل بینگهام ذکر شده است.

$$\tau = \tau_{0B} + \eta_B\dot{\gamma} \qquad (۲)$$

در این معادله، $\dot{\gamma}$ سرعت برشی (s^{-1})، τ تنش برشی (پاسکال)، τ_{0B} تنش تسلیم بینگهام (پاسکال) و η_B ویسکوزیته پلاستیک بینگهام (Pa.s) هستند (Salehi & Inanloodoghouz, 2023). ضرایب و خطاهای مدل بینگهام در جدول ۴ گزارش شد. مقدار ضریب تبیین، حداقل مجموع مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطا برای این مدل به‌ترتیب در محدوده ۰/۸۶۷۴ تا ۰/۹۹۷۶، ۰/۰۰۰۶ تا ۰/۰۹۰۶ و ۰/۰۰۷۲ تا ۰/۰۸۶۹ به‌دست آمد.

وجود اسیدهای آلی در محلول حاوی صمغ دانه بالنگو تأثیر قابل توجهی بر تغییرات تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک بینگهام داشت. در جدول ۴ تأثیر اسیدهای آلی بر مقدار تنش تسلیم بینگهام محلول صمغ دانه بالنگو گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن اسید به محلول صمغ و در نتیجه کاهش pH آن، مقدار تنش تسلیم مدل بینگهام کاهش یافته است. نمونه حاوی ۱٪ اسید سیتریک دارای کمترین تنش تسلیم و نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید تارتاریک دارای بیشترین تنش تسلیم بودند. نتایج نشان می‌دهد وقتی غلظت اسید مالیک از ۰/۵ به ۱ درصد افزایش یافت، مقدار تنش تسلیم نمونه‌ها به‌صورت معنی‌داری از ۰/۱۰۴ پاسکال به ۰/۰۷۰ پاسکال کاهش یافت (p<۰/۰۵).

جدول ۳- پارامترها و مقادیر خطای مدل قانون توان برای خواص رئولوژیکی محلول صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی

Table 3- Parameters and error values of the Power law model for the rheological properties of Balangu seed gum solution containing organic acids

اسید آلی **Organic acid**	غلظت اسید **Acid concentration**	ضریب قوام **Consistency coefficient (Pa.s^n)**	شاخص رفتار جریان **Flow behavior index**	مجموع مربعات خطا **Sum of squared error (SSE)**	ضریب تبیین **Correlation coefficient (r)**	جذر میانگین مربعات خطا **Root mean square error (RMSE)**
شاهد Control	0%	0.127±0.007 ^{a}	0.577±0.009 ^{de}	0.0016	0.9998	0.0109
آسکوربیک Ascorbic	0.5%	0.014±0.002 ^{cd}	0.769±0.023 ^{a}	0.0031	0.9968	0.0154
سیتریک Citric		0.015±0.005 ^{cd}	0.647±0.067 ^{bcd}	0.0005	0.9980	0.0062
مالیک Malic		0.029±0.008 ^{b}	0.494±0.064 ^{e}	0.0037	0.9763	0.0152
تارتاریک Tartaric		0.025±0.006 ^{bc}	0.635±0.045 ^{bcd}	0.0018	0.9977	0.0117
آسکوربیک Ascorbic	1%	0.013±0.003 ^{d}	0.711±0.058 ^{ab}	0.0005	0.9986	0.0066
سیتریک Citric		0.009±0.001 ^{d}	0.690±0.045 ^{abc}	0.0004	0.9975	0.0054
مالیک Malic		0.016±0.002 ^{cd}	0.573±0.036 ^{de}	0.0012	0.9930	0.0090
تارتاریک Tartaric		0.017±0.000 ^{cd}	0.589±0.042 ^{cde}	0.0004	0.9974	0.0060

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنادار است (p<۰/۰۵)

Different letters within each column represent significance difference (p<0.05).

تأثیر اسیدهای آلی بر مقدار ویسکوزیته پلاستیک (مدل بینگهام) محلول صمغ دانه بالنگو در جدول ۴ گزارش شده است. با افزایش غلظت اسید، مقدار ویسکوزیته پلاستیک نمونه‌ها کاهش یافت. مقدار ویسکوزیته پلاستیک بینگهام برای نمونه شاهد محلول تهیه شده از صمغ دانه بالنگو، برابر ۰/۰۱۱۹ پاسکال ثانیه بود که اختلاف معناداری با نمونه‌های حاوی اسید داشت. نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید آسکوربیک دارای بیشترین مقدار (۰/۰۰۳۸ پاسکال ثانیه) و نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید مالیک کمترین مقدار (۰/۰۰۱۴ پاسکال ثانیه) ویسکوزیته پلاستیک را داشتند. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اسید تارتاریک از ۰/۵ درصد به ۱ درصد، ویسکوزیته پلاستیک محلول به‌صورت معنی‌داری از ۰/۰۰۳۱ پاسکال ثانیه به ۰/۰۰۱۷ پاسکال ثانیه کاهش یافت (p<۰/۰۵).

مدل هرشل بالکلی

مدل هرشل بالکلی منحنی جریان یک ماده با تنش تسلیم و رفتار شل شدن برشی یا سفت شدن برشی در تنش‌های بالاتر از تسلیم را توصیف می‌کند (Sharoba & Ramadan, 2011). در بررسی خصوصیات رئولوژیکی مواد غذایی، مدل هرشل بالکلی به مدل‌های قانون توان یا بینگهام ترجیح داده می‌شود، زیرا زمانی‌که داده‌های تجربی کافی در دسترس باشد، منجر به مدل‌های دقیق‌تر رفتار رئولوژیکی می‌شود (Jannatamani *et al.*, 2022). معادله ۳، پارامترهای مربوط به مدل هرشل بالکلی را نشان می‌دهد.

$$\tau = \tau_{0H} + k_H \dot{\gamma}^{n_H} \quad (۳)$$

در این معادله، τ تنش برشی (پاسکال)، τ_{0H} تنش تسلیم (پاسکال)، k_H ضریب قوام (Pa.s^n)، γ سرعت برشی (s^{-1}) و n_H شاخص رفتار جریان برای مدل هرشل بالکلی می‌باشند. در این مطالعه، مدل هرشل بالکلی هم مشابه مدل قانون توان توصیف خوبی از رابطه بین تنش برشی و سرعت برشی با مقدار ضریب تبیین بالا (>۰/۹۴۰۶)، و مجموع مربعات خطا مناسب (<۰/۰۰۹۰) و جذر میانگین مربعات خطا پایین (<۰/۰۲۷۵) داشت (جدول ۵).

جدول ٤- پارامترها و مقادیر خطای مدل بینگهام برای خواص رئولوژیکی محلول صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی

Table 4- Parameters and error values of the Bingham model for the rheological properties of Balangu seed gum solution containing organic acids

اسید آلی Organic acid	غلظت اسید Acid concentration	تنش تسلیم بینگهام Bingham yield stress (Pa)	ویسکوزیته پلاستیک بینگهام Bingham plastic viscosity (Pa.s)	مجموع مربعات خطا Sum of squared error (SSE)	ضریب تبیین Correlation coefficient (r)	جذر میانگین مربعات خطا Root mean square error (RMSE)
شاهد Control	0%	0.590±0.015 [a]	0.0119±0.0002 [a]	0.0881	0.9909	0.0857
آسکوربیک Ascorbic	0.5%	0.082±0.011 [cd]	0.0038±0.0001 [b]	0.0035	0.9965	0.0170
سیتریک Citric		0.071±0.018 [de]	0.0019±0.0002 [e]	0.0022	0.9906	0.0134
مالیک Malic		0.104±0.018 [bc]	0.0015±0.0001 [ef]	0.0100	0.9363	0.0274
تارتاریک Tartaric		0.123±0.023 [b]	0.0031±0.0001 [c]	0.0054	0.9921	0.0207
آسکوربیک Ascorbic	1%	0.066±0.013 [de]	0.0024±0.0002 [d]	0.0029	0.9926	0.0150
سیتریک Citric		0.045±0.004 [e]	0.0015±0.0002 [ef]	0.0015	0.9901	0.0110
مالیک Malic		0.070±0.007 [de]	0.0014±0.0002 [f]	0.0034	0.9787	0.0161
تارتاریک Tartaric		0.079±0.007 [cd]	0.0017±0.0004 [ef]	0.0009	0.9951	0.0086

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنادار است (p<۰/۰۵)

Different letters within each column represent significance difference (p<0.05).

در جدول ۵ تأثیر اسیدهای آلی بر پارامترهای مدل هرشل بالکلی شامل مقدار تنش تسلیم، ضریب قوام و شاخص رفتار جریان محلول صمغ دانه بالنگو گزارش شده است. در این مطالعه مقدار عددی تنش تسلیم در محدوده $۱/۷۲×۱۰^{-۱۱}$ پاسکال تا $۷/۵۴×۱۰^{-۲}$ پاسکال به‌دست آمد.

ضریب قوام درجه مقاومت سیال در برابر جاری شدن را نشان می‌دهد. وجود اسیدهای آلی در محلول حاوی صمغ دانه بالنگو تأثیر قابل‌توجهی بر تغییرات ضریب قوام و شاخص رفتار جریان محلول صمغ داشت. مقدار ضریب قوام برای نمونه شاهد برابر $۰/۱۲۹\ Pa.s^n$ بود که اختلاف معناداری با نمونه‌های حاوی اسید داشت. با افزایش درصد اسید، مقدار ضریب قوام نمونه‌ها کاهش یافت. نمونه حاوی ۱٪ اسید تارتاریک دارای کمترین ضریب قوام ($۰/۰۰۸\ Pa.s^n$) و نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید مالیک دارای بیشترین ضریب قوام ($۰/۰۲۸\ Pa.s^n$) بودند. نتایج نشان داد وقتی غلظت اسید مالیک از ۰/۵ به ۱ درصد افزایش یافت، مقدار ضریب قوام نمونه‌ها به‌صورت معنی‌داری از $۰/۰۲۸\ Pa.s^n$ به $۰/۰۱۶\ Pa.s^n$ کاهش یافت (p<۰/۰۵).

در معادله هرشل بالکلی هم یک سیال با رفتار شل شدن برشی مقدار شاخص رفتار جریان کمتر از ۱ دارد. با افزایش غلظت اسید، مقدار شاخص رفتار جریان اکثر نمونه‌ها افزایش یافت (کاهش در رفتار سودوپلاستیکی). نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اسید مالیک از ۰/۵ درصد به ۱ درصد، شاخص رفتار جریان صمغ دانه بالنگو از ۰/۶۹۴ به ۰/۷۲۶ افزایش یافت، البته این افزایش معنی‌دار نبود (p>۰/۰۵). نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید آسکوربیک دارای بالاترین مقدار شاخص رفتار جریان (۰/۸۷۰) و نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید مالیک کمترین مقدار (۰/۴۹۴) را داشت. بهروزیان و همکاران (Behrouzian *et al.*, 2013) اثر تغییر pH (۳ تا ۹) بر خواص رئولوژیکی صمغ دانه شاهی را بررسی کردند. این پژوهشگران مدل‌های رئولوژیکی مختلف را برای برازش داده‌های تجربی استفاده کردند و مدل هرشل بالکلی را به‌عنوان بهترین

مدل برای بررسی خصوصیات رئولوژیکی صمغ دانه شاهی معرفی کردند (Behrouzian *et al.*, 2013).

جدول ۵- پارامترها و مقادیر خطای مدل هرشل بالکلی برای خواص رئولوژیکی محلول صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی

Table 5- Parameters and error values of the Herschel-Bulkley model for the rheological properties of Balangu seed gum solution containing organic acids

اسید آلی Organic acid	غلظت اسید Acid concentration	تنش تسلیم Yield stress (Pa)	ضریب قوام Consistency coefficient ($Pa.s^n$)	شاخص رفتار جریان Flow behavior index	مجموع مربعات خطا Sum of squared error (SSE)	ضریب تبیین Correlation coefficient (r)	جذر میانگین مربعات خطا Root mean square error (RMSE)
شاهد Control	0%	0.00033 ^b^	0.129±0.005 ^a^	0.577±0.009 ^cd^	0.0016	0.9998	0.0114
آسکوربیک Ascorbic	0.5%	0.04024 ^a^	0.009±0.003 ^c^	0.870±0.080 ^a^	0.0024	0.9976	0.0144
سیتریک Citric		0.00602 ^b^	0.013±0.005 ^c^	0.667±0.071 ^bc^	0.0005	0.9981	0.0063
مالیک Malic		0.00000 ^b^	0.028±0.008 ^b^	0.494±0.064 ^d^	0.0037	0.9763	0.0154
تارتاریک Tartaric		0.02907 ^ab^	0.018±0.005 ^c^	0.694±0.041 ^bc^	0.0016	0.9976	0.0114
آسکوربیک Ascorbic	1%	0.00185 ^b^	0.012±0.003 ^c^	0.717±0.066 ^b^	0.0005	0.9986	0.0068
سیتریک Citric		0.00003 ^b^	0.009±0.001 ^c^	0.690±0.045 ^bc^	0.0004	0.9975	0.0057
مالیک Malic		0.00000 ^b^	0.016±0.002 ^c^	0.573±0.036 ^cd^	0.0012	0.9930	0.0090
تارتاریک Tartaric		0.03691 ^a^	0.008±0.001 ^c^	0.726±0.021 ^b^	0.0002	0.9985	0.0046

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنادار است (p<۰/۰۵)

Different letters within each column represent significance difference (p<0.05).

مدل کاسون

مدل کاسون اساساً نیمه تجربی است و مبتنی بر در نظر گرفتن یک سوسپانسیون به‌عنوان سیستمی از ذرات است که تمایل به تشکیل ساختارهای زنجیره مانند دارند. مدل کاسون برای مطالعه و مدل‌سازی خصوصیات رئولوژیکی بسیاری از محصولات غذایی مانند شکلات، ماست، سس گوجه‌فرنگی و سایر مایعات پیچیده تحت شرایط حالت پایدار تقریب خوبی دارد (Sun *et al.*, 2024). معادله ۴، پارامترهای مربوط به مدل کاسون را نشان می‌دهد.

$$\tau^{0.5} = \tau_{0C}^{0.5} + \eta_C \dot{\gamma}^{0.5} \quad (۴)$$

در معادله ۴، $\dot{\gamma}$ سرعت برشی (s^{-1})، τ تنش برشی (پاسکال)، τ_{0C} تنش تسلیم کاسون (پاسکال) و η_C ویسکوزیته پلاستیک کاسون (Pa.s) هستند. پارامترها (تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک) و مقادیر خطای مدل کاسون برای خواص رئولوژیکی محلول صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی در جدول ۶ گزارش شده است. در این پژوهش متوسط مقدار ضریب تبیین، حداقل مجموع مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطا برای مدل کاسون به‌ترتیب برابر ۰/۹۹۱۴، ۰/۰۰۴۶ و ۰/۰۱۵۳ بود.

وجود اسیدهای آلی در محلول حاوی صمغ دانه بالنگو تأثیر قابل‌توجهی بر تغییرات تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک کاسون داشت. در جدول ۶ تأثیر اسیدهای آلی بر مقدار تنش تسلیم کاسون محلول صمغ دانه بالنگو گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن اسید به محلول صمغ و در نتیجه کاهش pH آن، مقدار تنش تسلیم مدل کاسون کاهش یافته است. مقدار تنش تسلیم برای نمونه شاهد برابر ۰/۲۶۲ پاسکال بود که اختلاف معناداری با نمونه‌های حاوی اسید داشت. نمونه حاوی ۱٪ اسید سیتریک دارای کمترین تنش تسلیم و نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید مالیک دارای بیشترین تنش تسلیم بودند. نتایج نشان داد وقتی غلظت اسید مالیک از ۰/۵ به ۱ درصد افزایش

یافت، مقدار تنش تسلیم نمونه‌ها به‌صورت معنی‌داری از ۰/۰۵۵ پاسکال به ۰/۰۳۲ پاسکال کاهش یافت (p<۰/۰۵).

همچنین، با افزایش غلظت اسید، مقدار ویسکوزیته پلاستیک نمونه‌ها کاهش یافت. مقدار ویسکوزیته پلاستیک کاسون برای نمونه شاهد محلول تهیه شده از صمغ دانه بالنگو، برابر ۰/۰۸۳ پاسکال ثانیه بود که اختلاف معناداری با نمونه‌های حاوی اسید داشت. نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید آسکوربیک دارای بیشترین مقدار ویسکوزیته پلاستیک (۰/۰۵۴ پاسکال ثانیه) و نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید مالیک کمترین (۰/۰۲۸ پاسکال ثانیه) مقدار را داشت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اسید آسکوربیک از ۰/۵ درصد به ۱ درصد، ویسکوزیته پلاستیک محلول به‌صورت معنی‌داری از ۰/۰۵۴ پاسکال ثانیه به ۰/۰۴۲ پاسکال ثانیه کاهش یافت (p<۰/۰۵).

جدول ٦- پارامترها و مقادیر خطای مدل کاسون برای خواص رئولوژیکی محلول صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی

Table 6- Parameters and error values of the Casson model for the rheological properties of Balangu seed gum solution containing organic acids

اسید آلی Organic acid	غلظت اسید Acid concentration	تنش تسلیم کاسون Casson yield stress (Pa)	ویسکوزیته پلاستیک کاسون Casson plastic viscosity (Pa.s)	مجموع مربعات خطا Sum of squared error (SSE)	ضریب تبیین Correlation coefficient (r)	جذر میانگین مربعات خطا Root mean square error (RMSE)
شاهد Control	0%	0.262±0.012 [a]	0.083±0.001 [a]	0.0240	0.9975	0.0448
آسکوربیک Ascorbic	0.5%	0.016±0.011 [d]	0.054±0.001 [b]	0.0027	0.9973	0.0145
سیتریک Citric		0.028±0.011 [cd]	0.035±0.003 [de]	0.0010	0.9959	0.0087
مالیک Malic		0.055±0.015 [b]	0.028±0.003 [e]	0.0065	0.9588	0.0214
تارتاریک Tartaric		0.049±0.014 [bc]	0.044±0.001 [c]	0.0025	0.9963	0.0141
آسکوربیک Ascorbic	1%	0.021±0.008 [d]	0.042±0.003 [cd]	0.0013	0.9966	0.0101
سیتریک Citric		0.015±0.003 [d]	0.028±0.008 [e]	0.0008	0.9949	0.0077
مالیک Malic		0.032±0.005 [cd]	0.029±0.003 [e]	0.0020	0.9880	0.0120
تارتاریک Tartaric		0.034±0.001 [bcd]	0.032±0.005 [e]	0.0003	0.9984	0.0046

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنادار است (p<۰/۰۵)

Different letters within each column represent significance difference (p<0.05).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر اسیدهای آلی خوراکی شامل آسکوربیک، سیتریک، مالیک و تارتاریک در دو غلظت ۰/۵ و ۱ درصد بر ویسکوزیته و پارامترهای رئولوژیکی محلول صمغ دانه بالنگو مورد بررسی قرار گرفت. محلول‌های ۰/۲ درصد صمغ دانه بالنگو (شاهد و نمونه‌های حاوی اسید) رفتار سودوپلاستیکی از خود نشان دادند و با افزایش سرعت برشی، ویسکوزیته آنها کاهش یافت. با افزایش درصد اسیدهای آلی، ویسکوزیته محلول‌ها کاهش یافت و بیشترین کاهش ویسکوزیته مربوط به اسید سیتریک ۱ درصد بود. رفتار رئولوژیکی محلول‌ها با استفاده از مدل‌های قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون مدل‌سازی شد. مدل قانون توان با بیشترین مقدار ضریب تبیین (<۰/۹۴۰۶)، و حداقل مجموع مربعات خطا (>۰/۰۰۹۰) و جذر میانگین مربعات خطا (>۰/۰۲۷۵) برای همه نمونه‌ها، عملکرد خوبی داشت. با افزایش درصد اسید، مقدار ضریب قوام (مدل‌های قانون توان و هرشل بالکلی) نمونه‌ها کاهش یافت. با افزایش غلظت اسید، مقدار شاخص رفتار جریان اکثر نمونه‌ها افزایش یافت (کاهش در رفتار سودوپلاستیکی). با افزودن اسید به محلول صمغ و در نتیجه کاهش pH آن، مقدار تنش تسلیم مدل‌های بینگهام و کاسون کاهش یافته است. همچنین با افزایش غلظت اسید، مقدار ویسکوزیته پلاستیک (مدل‌های بینگهام و کاسون) نمونه‌ها کاهش یافت.

میزان مشارکت نویسندگان

فخرالدین صالحی: مدیریت داده‌ها، تحلیل رسمی، تأمین مالی، تحقیق و بررسی، مدیریت پروژه، نرم‌افزار، نظارت، اعتبارسنجی، نوشتن- پیش‌نویس اصلی، نوشتن- بررسی و ویرایش. **مریم تشکری و کیمیا ثمری:** مدیریت داده‌ها، تحقیق و بررسی، نرم‌افزار، نوشتن- پیش‌نویس اصلی.

منابع تأمین مالی

این مقاله بخشی از یک پروژه تحقیقاتی است که در سال ۱۴۰۲ در دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است. هزینه‌های انجام این پژوهش از محل پژوهانه به شماره ۴۰۲۱۷۴، تأمین شده از سوی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا، پرداخت شده است.

سپاسگزاری

بدینوسیله از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا جهت حمایت مالی از این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌شود.

References

1. Amin, A.M., Ahmad, A.S., Yin, Y.Y., Yahya, N., & Ibrahim, N. (2007). Extraction, purification and characterization of durian (*Durio zibethinus*) seed gum. *Food Hydrocolloids*, *21*(2), 273-279. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.04.004
2. Behrouzian, F., Razavi, S.M.A., & Karazhiyan, H. (2013). The effect of pH, salts and sugars on the rheological properties of cress seed (*Lepidium sativum*) gum. *International Journal of Food Science & Technology*, *48*(12), 2506-2513. https://doi.org/10.1111/ijfs.12242
3. Brenelli, S., Campos, S., & Saad, M. (1997). Viscosity of gums in vitro and their ability to reduce postprandial hyperglycemia in normal subjects. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, *30*(12), 1437-1440. https://doi.org/10.1590/S0100-879X1997001200009
4. Farahnaky, A., Shanesazzadeh, E., Mesbahi, G., & Majzoobi, M. (2013). Effect of various salts and pH condition on rheological properties of *Salvia macrosiphon* hydrocolloid solutions. *Journal of Food Engineering*, *116*(4), 782-788. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.036
5. Hayta, M., Dogan, M., & Aslan Türker, D. (2020). Rheology and microstructure of galactomannan–xanthan gum systems at different pH values. *Journal of Food Process Engineering*, *43*(12), e13573. https://doi.org/10.1111/jfpe.13573
6. Jannatamani, H., Motamedzadegan, A., Farsi, M., & Yousefi, H. (2022). Rheological properties of wood/bacterial cellulose and chitin nano-hydrogels as a function of concentration and their nano-films properties. *IET Nanobiotechnology*, *16*(4), 158-169. https://doi.org/10.1049/nbt2.12083
7. Kang, J., Yue, H., Li, X., He, C., Li, Q., Cheng, L., Zhang, J., Liu, Y., Wang, S., & Guo, Q. (2023). Structural, rheological and functional properties of ultrasonic treated xanthan gums. *International Journal of Biological Macromolecules*, *246*, 125650. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125650
8. Koocheki, A., Hesarinejad, M.A., & Mozafari, M.R. (2022). *Lepidium perfoliatum* seed gum: investigation of monosaccharide composition, antioxidant activity and rheological behavior in presence of salts. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *9*(1), 61. https://doi.org/10.1186/s40538-022-00322-2
9. Kumar, Y., Roy, S., Devra, A., Dhiman, A., & Prabhakar, P.K. (2021). Ultrasonication of mayonnaise formulated with xanthan and guar gums: Rheological modeling, effects on optical properties and emulsion stability. *LWT*, *149*, 111632. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111632
10. Liu, J., Shen, J., Shim, Y.Y., & Reaney, M.J.T. (2016). Carboxymethyl derivatives of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) gum: characterisation and solution rheology. *International Journal of Food Science & Technology*, *51*(2), 530-541. https://doi.org/10.1111/ijfs.12985
11. Medina-Torres, L., Brito-De La Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B., & Katthain, R. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloids*, *14*(5), 417-424. https://doi.org/10.1016/S0268-005X(00)00015-1
12. Mullineux, G., & Simmons, M.J.H. (2008). Influence of rheological model on the processing of yoghurt. *Journal of Food Engineering*, *84*(2), 250-257. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.05.015
13. Nor Hayati, I., Wai Ching, C., & Rozaini, M.Z.H. (2016). Flow properties of o/w emulsions as affected by xanthan gum, guar gum and carboxymethyl cellulose interactions studied by a mixture regression modelling. *Food Hydrocolloids*, *53*, 199-208. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.04.032
14. Nour, V., Trandafir, I., & Ionica, M.E. (2010). HPLC organic acid analysis in different citrus juices under reversed phase conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *38*(1), 44-48. https://doi.org/10.15835/nbha.43.2.10081

15. Ozgur, A., Dogan, M., & Karaman, S. (2017). Rheological interactions of the xanthan gum and carboxymethyl cellulose as alternative to pectin in organic acid–sucrose model system: simplex lattice mixture design approach. *European Food Research and Technology*, *243*(6), 1041-1056. https://doi.org/10.1007/s00217-016-2809-7
16. Rana, V., Rai, P., Tiwary, A.K., Singh, R.S., Kennedy, J.F., & Knill, C.J. (2011). Modified gums: Approaches and applications in drug delivery. *Carbohydrate Polymers*, *83*(3), 1031-1047. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.09.010
17. Salehi, F. (2020). Effect of common and new gums on the quality, physical, and textural properties of bakery products: A review. *Journal of Texture Studies*, *51*(2), 361-370. https://doi.org/10.1111/jtxs.12482
18. Salehi, F., & Inanloodoghouz, M. (2023). Rheological properties and color indexes of ultrasonic treated aqueous solutions of basil, *Lallemantia*, and wild sage gums. *International Journal of Biological Macromolecules*, *253*, 127828. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127828
19. Salehi, F., Razavi Kamran, H., & Goharpour, K. (2023). Production and evaluation of total phenolics, antioxidant activity, viscosity, color, and sensory attributes of quince tea infusion: Effects of drying method, sonication, and brewing process. *Ultrasonics Sonochemistry*, *99*, 106591. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106591
20. Salehi, F., Samary, K., & Tashakori, M. (2024). Influence of organic acids on the viscosity and rheological behavior of guar gum solution. *Results in Engineering*, *22*, 102307. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102307
21. Satorabi, M., Salehi, F., & Rasouli, M. (2021). The influence of xanthan and balangu seed gums coats on the kinetics of infrared drying of apricot slices: GA-ANN and ANFIS modeling. *International Journal of Fruit Science*, *21*(1), 468-480. https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1898520
22. Sharoba, A.M., & Ramadan, M.F. (2011). Rheological behavior and physicochemical characteristics of goldenberry (*Physalis peruviana*) juice as affected by enzymatic treatment. *Journal of Food Processing and Preservation*, *35*(2), 201-219. https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00471.x
23. Sun, H., Jiang, Y., Zhang, Y., & Jiang, L. (2024). A review of constitutive models for non-Newtonian fluids. *Fractional Calculus and Applied Analysis*. https://doi.org/10.1007/s13540-024-00294-0
24. Yildiz, F. (2010). Food acids: Organic acids, volatile organic acids, and phenolic acids, in: Yildiz, F. (Ed.), *Advances in Food Biochemistry*, 1st Edition ed. CRC Press, Boca Raton, p. 28. https://doi.org/10.1201/9781420007695-15
25. Yousefi, A., Elmarhoum, S., Khodabakhshaghdam, S., Ako, K., & Hosseinzadeh, G. (2022). Study on the impact of temperature, salts, sugars and pH on dilute solution properties of *Lepidium perfoliatum* seed gum. *Food Science & Nutrition*, *10*(11), 3955-3968. https://doi.org/10.1002/fsn3.2991